Etude et construction d’un appareil destiné au test, reconditionnement (régénération) et à l’apparentement (« matched pair of tubes ») des tubes électroniques de puissance (GU74B-4CX800A).

Le présent article (qui sera publié en plusieurs parties) poursuit différents buts, à savoir :

- rappeler et/ou expliquer pourquoi il est nécessaire de reconditionner (régénérer) les tubes de puissance qui n’ont plus été utilisés depuis longtemps (plusieurs années voire plusieurs dizaines d’années).
- d’exposer comment procéder pour d’une part reconditionner (régénérer) le tube, et pour d’autre par, tracer (manuellement) un graphique qui, par comparaison (de tube en tube) permettra de réaliser l’apparentement des tubes (« matched pair of tubes »).
- de présenter la construction d’un appareil « home made » destiné à réaliser les opérations décrites ci avant.

L’appareil « home made ».

L’appareil « home made » (photo n° 1) chargé de tester, reconditionner (régénérer) et de permettre le tracé de la caractéristique Va-Vg1 du tube se compose de 3 modules à savoir :

- le module « alimentation HT » (de 200 à 3000VDC sous 2A en continu) (photo n° 2)
- le module « alimentation filament, grille de commande G1, grille d’écran G2 » (photo n° 3)
- le module qui supporte le tube à reconditionner ainsi que le ventilateur de refroidissement du tube (photo n° 4)

Photo n° 1 : le banc de test du GU74B.

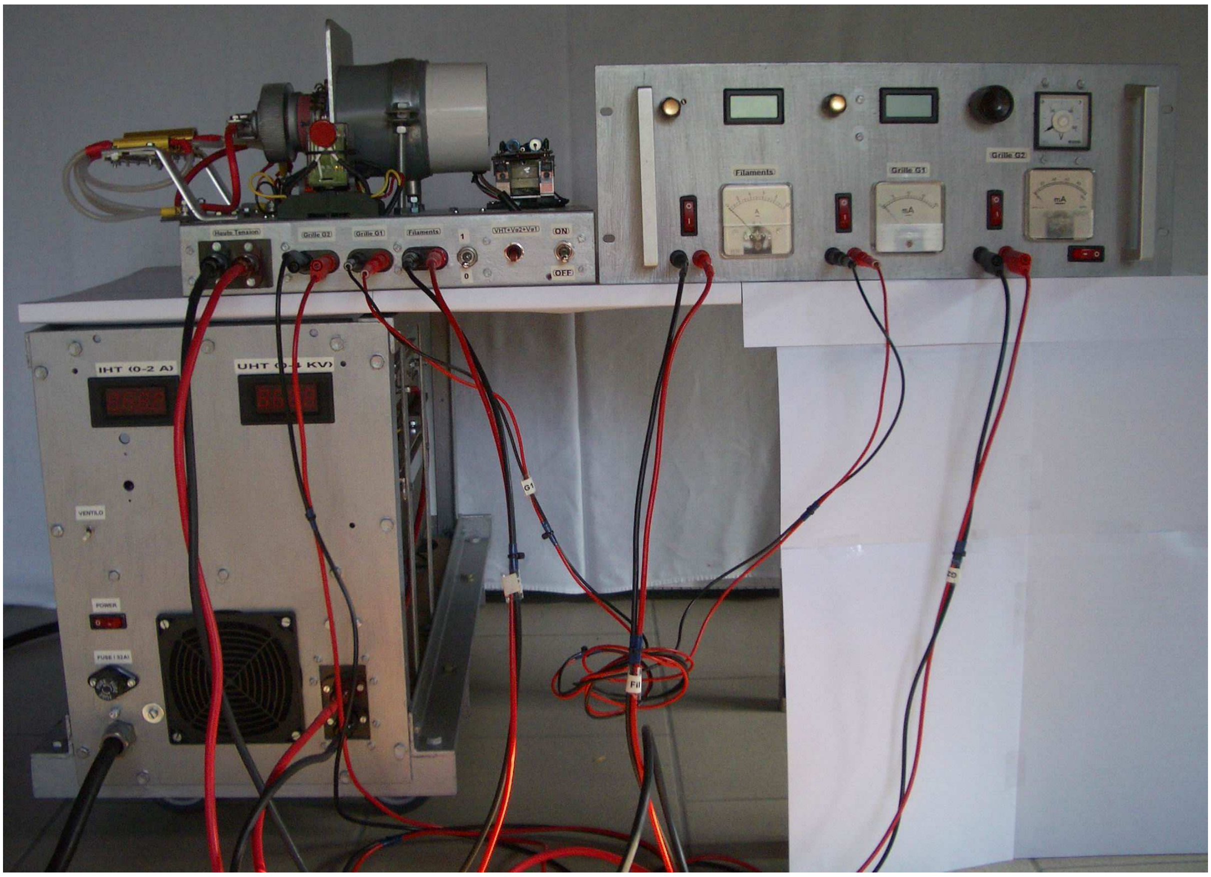
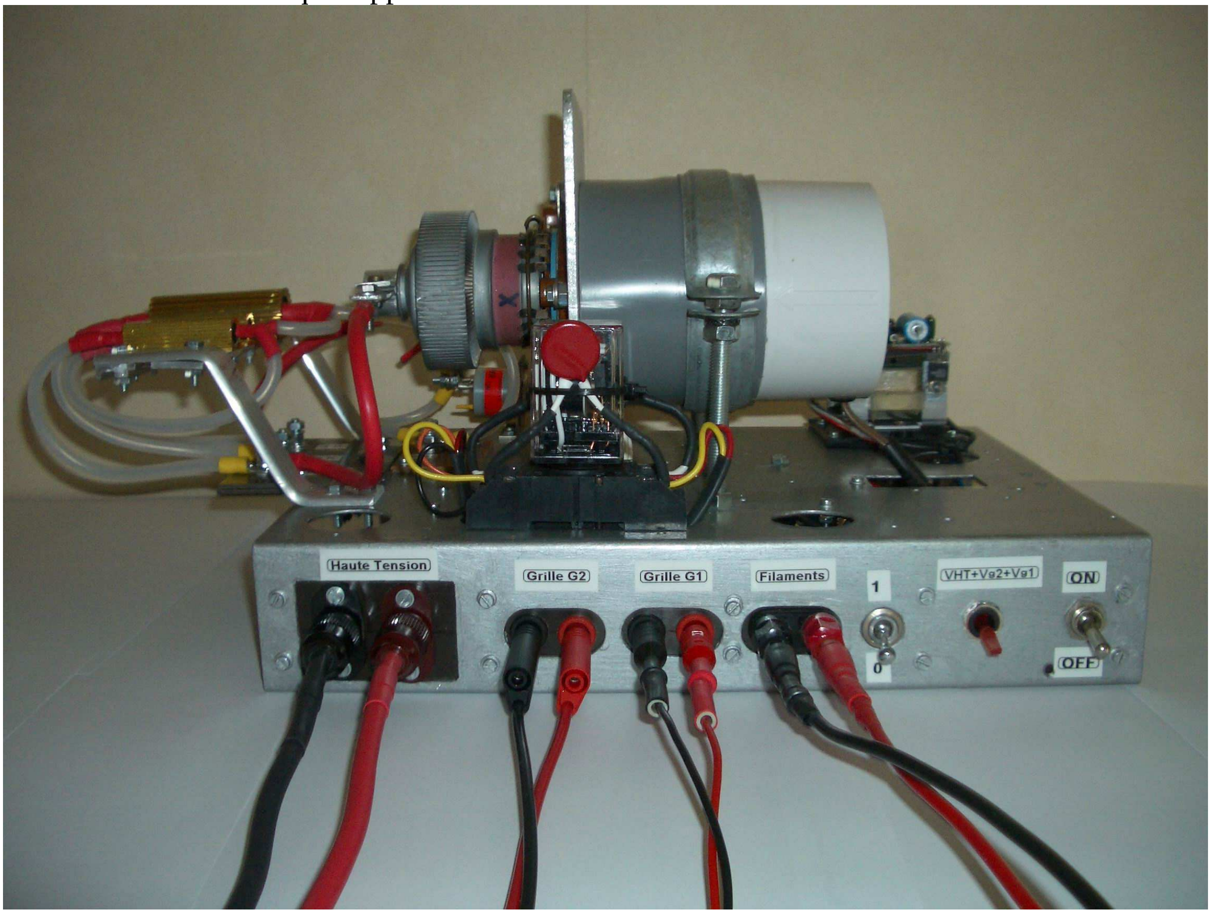


Photo n° 2 : l’alimentation HT (4KV-2A).

Photo n° 3 : l’alimentation du filament et des grilles G1 et G2.

Photo n° 4 : le chassis qui supporte le GU74B à reconditionner et à tester.



Le choix d'un tube électronique de puissance.

La mise en exploitation (par l'amateur) d'un tube électronique de puissance pose le délicat problème du choix entre :

- soit un tube neuf et moderne (par exemple un tube EIMAC)
- soit une tube de récupération tel qu'un tube NOS (New Old Stock) c'est-à-dire un tube déclassé (surplus militaire par exemple) mais jamais utilisé

On constatera que :

- le tube neuf et moderne sera coûteux, facile à trouver (même apparenté) et sera garanti par le constructeur
- le tube NOS sera bon marché, parfois difficile à trouver (surtout si plusieurs tubes doivent être apparentés), n'offrira (en principe) aucune garantie quand à son état (le tube est-il réellement un tube non utilisé ou a-t-il été beaucoup utilisé ?)

Actuellement, plusieurs constructeurs de PA (Power Amplifier) utilisent des tubes NOS (tels que le GU74B-4CX800A). Nous citerons ALPHA (ampli ALPHA99), ACOM (ampli ACOM1000 et 2000), EMTRON (les ampli EMTRON DX-1, DX-2, …), …
Certains de ces PA utilisent une paire de tubes apparentés (« matched pair of tubes »).

Le tube électronique de puissance GU74B (4CX800A).

Entre 1980 et 1992, l'armée russe construit la tétrode de puissance GU74B dont les caractéristiques principales (fonctionnement en classe AB1) sont les suivantes :

- tension de filament (cathode « oxide coated » à chauffage indirect) : Vfil (CA ou DC) de 12.6V (de 11.9 à 13.3 V)
- courant de filament : Ifil de 3.6A (de 3.3 à 3.9A)
- tension de grille de commande Vg1 de l'ordre de – 30VDC
- tension de grille d'écran Vg2 de 300VDC
- tension d'anode Va de 2KVDC
- courant d'anode Ia de 0.5A
- courant de grille d'écran Ig2 de 20 mA
- Puissance à l'anode Pa de 600W
- Puissance à la grille d'écran Pg2 de 15W
- Puissance à la grille de commande Pg1 de 2W
- fréquence maximum de 250 Mhz
- ventilation forcée de 30 m^3/h (à la température de 25°C)
- temps de chauffage de la cathode de 150 secondes

En 1992, l'armée russe ayant décidé d'arrêter la fabrication du GU74B, la société russe SVETLANA (Saint-Petersbourg) décide de construire un tube 4CX800A qui serait l'équivalent du GU74B.
Les procédés de fabrication ainsi que les matériaux utilisés étant plus modernes (que ceux utilisés par l'armée russe) on constate qu'il est possible d'exploiter le 4CX800A au-delà des caractéristiques du GU74B. C'est ainsi que certains utilisateurs de tubes 4CX800A (notamment certains fabricants de PA HF) exploitent le 4CX800A avec des caractéristiques plus élevées (que celles prévues à l'origine par le GU74B) à savoir :

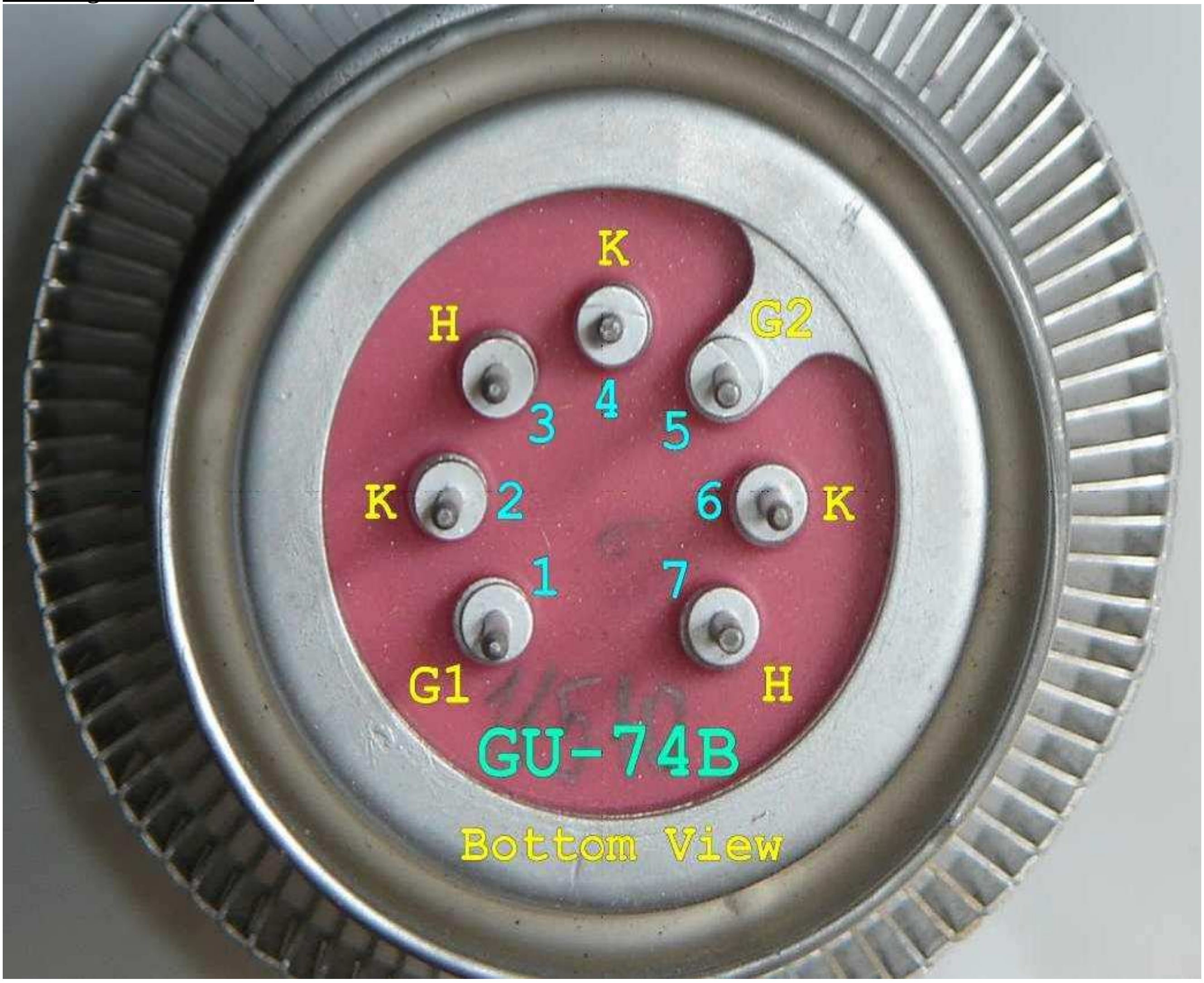
- Va de 2.500V (plutôt que 2000V)
- VUg2 de 350V (plutôt que 300V)
- Ia de 0.8A (plutôt que 0.5A)

- Pa de 800W (plutôt que 600W)
- …

Après l’arrêt de la fabrication, le tube 4CX800A étant devenu difficile – voir impossible - à trouver, les utilisateurs se rabattent sur le tube GU74B qui est mis en vente en tant que matériel déclassé (surplus militaire) et ce sous la forme de NOS (New Old Stock) c’est-à-dire sous la forme d’un tube déclassé mais jamais utilisé.

<u>Le tube GU74B (4CX800A).</u>

Brochage du GU74B.



Le degré de vide qui règne dans un tube électronique.

Rappel : le tube électronique (triode, tétrode, …) est constitué d'éléments (le filament, la cathode, les grilles, l'anode) qui sont placés dans une enveloppe (verre, métal, céramique, …) dans laquelle règne **le vide**.

Dans ces conditions de vide, les éléments du tube (bien que placés très près les uns des autres) supportent sans problème des tensions importantes (par exemple 2 KV sur l'anode, 400V sur la grille écran, …) et cela car ils sont entourés par le vide.

Dans le cas d'un tube non utilisé depuis longtemps (plusieurs années – voire plusieurs dizaines d'années), **on constate que le vide n'est plus parfait.**

En effet, sachant que les éléments métalliques (tungstène, thorium, strontium, …) qui constituent le tube ne sont pas purs à 100%, on constate que des réactions chimiques (entre les impuretés et les éléments qui les contiennent) seront à l'origine de la création de molécules gazeuses. Les atomes étrangers réagissent chimiquement et créent diverses molécules gazeuses qui, petit à petit, tendent à remplacer le vide (qui est nécessaire pour assurer le

fonctionnement normal du tube). Chaque molécule de gaz qui se crée diminue le degré de vide; le vide est altéré car il est partiellement remplacé par diverses molécules gazeuses.

Le « flashover ».

Si le vide n'est pas parfait, l'application d'une haute tension (principalement à l'anode) peut provoquer l'apparition d'un arc électrique (« flashover ») entre les composants situés à l'intérieur du tube (arc entre l'anode et une grille) et/ou à l'extérieur du tube (arc entre un élément du tube et les composants de l'alimentation haute tension).
De plus, ces arcs électriques (« flashover ») qui ionisent les molécules gazeuses, créent des ions positifs qui se dirigeront vers la cathode : il y a bombardement de la cathode.

On peut donc dire que le « flashover » peut endommager – voire détruire - le tube et/ou les circuits d'alimentation (de l'anode, de la grille écran, …).
Pour éviter les dégâts provoqués par un éventuel « flashover », il faut, d'une part protéger le tube et ses circuits d'alimentation, et d'autre part s'assurer que le tube utilisé présente un degré de vide parfait.

Pour protéger le tube et ses circuits d'alimentation contre le « flashover », il est conseillé :

- d'ajouter un « varistor » (MOV : « Metal Oxide Varistor », VDR : « Volt Dependant Resistor ») en parallèle sur le circuit à protéger. Lors de l'apparition d'un « flashover », le « varistor » présentera – en un temps très court- une très grande résistance. On notera cependant qu'un « varistor » soumis à de nombreux « flashover » peut être détruit.
- d'ajouter un « tube à gaz » (GTA : « Gas Tube Arrester », GDT « Gas Discharge Tube ») en parallèle sur l'élément à protéger. Lors de l'apparition d'un « flashover » le « tube à gaz » s'ionise rapidement et court-circuite l'élément à protéger.
- d'ajouter (généralement dans l'alimentation haute tension de l'anode) une résistance série (de quelques dizaines d'ohms et de puissance convenable) qui en cas de « flashover » limitera le courant de court-circuit.

Le reconditionnement (la régénération) d'un tube.

Nous avons vu précédemment que le tube électronique non utilisé depuis longtemps présentait un vide partiel qui était à l'origine des « flashovers »; ceux-ci étant à l'origine de l'endommagement – voire de la destruction- du tube et/ou de ses circuits d'alimentation.

Nous pouvons donc en conclure que dans le cas d'un tube électronique non utilisé depuis longtemps, le vide doit être reconstitué; il est donc nécessaire de reconditionner (de régénérer) le tube.

Les méthodes de reconditionnement (régénération) auront pour but principal d'augmenter le degré de vide dans le tube.

Le « getter ».

Pour reconstituer le vide (qui a été partiellement perdu dans le tube) le constructeur du tube exploite la notion de « getter ».
Le « getter » est un « piège à gaz » qui est ajouté dans le tube (lors de sa fabrication) et qui est chargé de réagir chimiquement avec les molécules gazeuses pour les neutraliser et ce dans le but de reconstituer le vide dans le tube.
La composition chimique du « getter » (alliages de baryum, zirconium, titane, …) est directement fonction de la nature des matériaux qui composent le tube. Des sociétés spécialisées (dans la conception des « getters ») étudient et mettent au point le « getter » à utiliser lors de la fabrication du tube.
Pour rendre le « getter » actif, il faut le chauffer.
Dans le cas d'un tube avec une enveloppe « céramique » ou « métal-céramique » (tel que le GU74B), le « getter » est situé à proximité de la cathode.

La cathode.

L'élément le plus important dans un tube électronique est la cathode dont le rôle est d'émettre des électrons dont le trajet (vers l'anode) sera influencé par les grilles de commande et d'écran.
En effet, la durée de vie d'un tube électronique est déterminée par la durée de vie de la cathode; la durée de vie de celle-ci étant déterminée par la température de la cathode, le degré de vide dans le tube et la pureté des matériaux qui constituent la cathode.

Le chauffage « direct » ou « indirect » de la cathode.

En théorie, il existe 2 grands types de cathodes : la cathode « thoriated filament » et la cathode « oxide coated ».

La cathode peut être constituée simplement d'un filament qui, chauffé, émettra les électrons. Dans ce cas, le filament sert de cathode et le chauffage de la cathode est dit à « chauffage direct ».
La cathode peut aussi être constituée d'un tube métallique (en nickel par exemple) recouvert d'oxydes métalliques et dans lequel est placé un filament. Dans ce cas, le filament chauffe la cathode qui émet les électrons; le chauffage de la cathode est dit à « chauffage indirect ».

Le « thoriated filament ».

La cathode (à chauffage direct) est un filament (composé de tungstène et de thorium) qui est chauffé à plus ou moins 2400°C.
Ce type de cathode présente une durée de vie très longue, résiste bien aux « flashovers » et est principalement utilisé dans le cas d'un tube à très grande puissance.

Le filament ou la cathode « oxide coated ».

Le filament (chauffage direct) ou la cathode (chauffage indirect) est recouvert d'un mélange d'oxydes métalliques (baryum, strontium, …) qui est chauffé à plus ou moins 1000 °Celcius.
On constatera que :

- les oxydes métalliques utilisés sont de très bons émetteurs d'électrons
- ce type de cathode est principalement utilisé dans le cas d'un tube électronique de moyenne puissance
- la cathode peut être endommagée – voire détériorée - par un bombardement ionique. Si le degré de vide est médiocre, l'application de la HT peut provoquer un « flashover » qui, en ionisant les molécules de gaz, provoquera l'apparition d'ions (positifs) qui, en se dirigeant vers la cathode, bombarderont la cathode
- la durée de vie d'une cathode « oxide coated » est inférieure (à celle présentée par les tubes « thoriated filament ») et ce à cause des impuretés qui existent dans le tube (en nickel par exemple) qui constitue la cathode

Le chauffage de la cathode d'un tube électronique GU74B qui n'a pas servi depuis longtemps.

Le tube électronique GU74B exploite un « chauffage indirect » d'une cathode du type « oxide coated ».

Sachant que la résistance **à froid** du filament est plus petite qu'à la température de fonctionnement normal, on constatera que, lors de l'application de la Vfil, le Ifil instantané de pointe peut atteindre une valeur de 2 à 5 fois le Ifil de fonctionnement.

Pour un tube GU74B, si on applique à froid une Vfil de 12.6V (CA ou CC), le Ifil instantané de pointe peut être de 9A (au lieu de 3.6A à chaud).

Lorsque le chauffage du filament est à faire **pour la première fois** (dans le cas d'un tube électronique GU74B qui n'a pas servi depuis longtemps), il est important que le filament puisse atteindre **lentement** sa température finale de fonctionnement. Il est conseillé :

- d'abord, d'appliquer une Vfil réduite (quelques volts) et ce pour permettre, d'une part, de diminuer le Ifil instantané de pointe dans le filament et, d'autre part, pour permettre au filament d'atteindre une certaine température
- ensuite d'augmenter graduellement la Vfil (avec des intervalles de temps de quelques minutes à quelques heures) jusqu'à atteindre la Vfil préconisée par le constructeur (dans ce cas, le Ifil devrait être proche de celui annoncé par le constructeur)

Personnellement :

- j'utilise dans le circuit de chauffage du filament une résistance en série avec le filament; résistance qui sera (manuellement) court-circuitée après quelques minutes

- j’augmente la Vfil périodiquement (quelques dizaines de minutes) pour finalement appliquer la Vfil préconisée par le constructeur (Vfil de 12.6 V CA ou DC pour un Ifil de 3.6A)
- <u>exemples</u> :
    - Vfil de 3V pendant 1 heure
    - Vfil de 5V pendant 1 heure
    - Vfil de 7.5V pendant 1 heure
    - Vfil de 10V pendant 1 heure
    - Vfil de 12.5V (la Vfil nominale) pendant 12 heures

Remarque : pendant ces opérations de chauffage de la cathode, **<u>le tube doit être normalement ventilé.</u>**

<u>Principes de reconditionnement (régénération) d’un tube à partir de son « getter ».</u>

Rappels :

- un tube non utilisé depuis longtemps présente un vide imparfait car diverses molécules gazeuses ont été créées par la réaction chimique entre les composants du tube et les impuretés contenues dans les éléments du tube.
- dans ces conditions, la mise en exploitation du tube sous ses tensions normales de fonctionnement (V d’anode, V de grille, …) présente le risque de la création d’arcs électriques («flashover ») entre les éléments du tube et des circuits qui alimentent le tube; il y a un risque sérieux de destruction du tube et/ou d’endommagement des circuits qui alimentent le tube.

Dans le cas d’un tube de puissance non utilisé depuis longtemps, il est impératif de le reconditionner (de le régénérer) et ce avant de le mettre en exploitation.

Pour reconditionner (régénérer) un tube dont le vide à partiellement disparu, il faut chauffer le filament du tube pour que le « getter » (qui est contenu dans le tube) puisse jouer son rôle c’est-à-dire puisse reconstituer le vide (en éliminant les molécules gazeuses indésirables).

Côté pratique, le reconditionnement du tube se fait en chauffant le filament du tube à ses valeurs nominales (12.6V pour un tube GU74B-4CX800A) sans appliquer les autres tensions (pas de tension d’anode, pas de tension de grille de commande et d’écran) et cela tout en ventilant le tube.

La question qui se pose le plus souvent est « combien de temps faut-il chauffer le filament ? ». La réponse est difficile – voire impossible – à donner. Il est cependant évident que si le vide est fortement dégradé, il faudra chauffer longtemps.

Dans le cas d’un tube électronique hermétiquement scellé, il est pratiquement impossible de connaître l’état du vide car – à ma connaissance - il n’existe aucun moyen pour mesurer le degré de vide dans un tel tube.

Dans ces conditions, il n’est pas possible, scientifiquement parlant, de déterminer le temps nécessaire pour que le « getter » puisse reconstituer le vide; il est cependant judicieux de conseiller de chauffer le filament pendant plusieurs heures – voire plusieurs jours.

Les tests préliminaires au reconditionnement (la régénération) du tube.

Avant de procéder au reconditionnement (la régénération) du tube, il est judicieux de s'assurer :

- que le filament n'est pas coupé. La mesure (à froid) de la continuité du filament (qui se fera à l'ohmmètre placé - sur l'échelle la plus basse- entre les broches 3 et 7 du tube) doit afficher une valeur de l'ordre de 1.7 Ohms.
- qu'il n'y a pas de court-circuit franc entre les différentes électrodes du tube (filament, cathode, grille de commande, grille d'écran, anode). Le test (qui se fera à l'ohmmètre de broche en broche) ne doit afficher aucune continuité entre les différents éléments.
- Remarque : dans le cas du tube GU74B, la cathode est reliée aux broches 2, 4 et 6.

Ces tests garantissent que le filament n'est pas coupé et qu'il n'y a pas (à froid) de court-circuit franc entre les différents éléments du tube.
Cette garantie n'est cependant pas absolue car, placé dans les conditions normales de fonctionnement (à chaud), le tube peut malheureusement présenter diverses anomalies (« flashover », court-circuit, …).

Préparation de la mise en exploitation et test du tube (après régénération du vide).

Le but est de faire fonctionner le tube, d'abord avec un débit anodique réduit (25 mA par exemple), ensuite avec un débit normal (compte tenu de la puissance anodique à ne pas dépasser – voir ultérieurement).

Procédure à appliquer (après avoir chauffé le filament pendant au moins 150 secondes et en ventilant le tube) :

1. Placer dans le circuit anodique une résistance de 100K.
    a. Appliquer des Va et Vg2 réduites (par exemple Va de 500V et Vg2 de 100V)
    b. Appliquer une Vg1 au-delà du cut-off (-90V)
    c. Ajuster Vg1 pour que le Ia soit de l'ordre de 25 mA
    d. Laisser fonctionner pendant quelques heures

2. Augmenter Va (à 1000V) et Vg2 (à 200V).
    a. Ajuster Vg1 pour que le Ia reste à 25 mA
    b. Laisser fonctionner pendant quelques heures

3. Remplacer la résistance anodique de 100K par une résistance de 50K et refaire les opérations 1 et 2.
4. Remplacer la résistance anodique de 50k par une résistance de 1K et refaire les opérations 1 et 2.
5. Enlever la résistance anodique de 1K et refaire les opérations 1 et 2.

6. Augmenter Va et Vg2 à leur valeur nominale (Va=2000V et Vg2=300V)
    a. Ajuster Vg1 pour que le Ia reste à une valeur réduite (100 mA par exemple)
    b. Laisser fonctionner pendant quelques heures

7. Laisser Va et Vg2 à leur valeur nominale (Va=2000V et Vg2=300V)

a. Ajuster Vg1 pour que le Ia soit à la valeur proche du Ia maximum de 0.3A. Ce Ia maximum (à ne pas dépasser) se calcule (voir ultérieurement) pour ne pas dépasser la puissance anodique maximum (qui est de 600 W pour le GU74B).
b. Laisser fonctionner pendant quelques minutes

Remarques :

- Si pendant les opérations de test, il y « flashover », il est conseillé de repasser à une opération antérieure (réduire les tensions Va et Vg2) et de fonctionner ainsi pendant quelques heures.
- Pour se prémunir des dégâts occasionnés par un « flashover » :
    - il est utile de placer en série (dans l'alimentation HT) une résistance (de quelques dizaines d'ohms et de puissance convenable) dans le but de limiter le courant de court-circuit provoqué par le « flashover ».
    - de connecter (aux grilles g1 et g2) un « tube à gaz » (GTA – Gas Tube Arrester, GDT – Gas Discharge Tube) qui en cas de « flashover » s'ionise et court-circuite la grille.
    - de déconnecter temporairement, la capacité placée dans l'alimentation HT car elle représente une grande quantité d'énergie qui (lors du « flashover ») générera un courant de court-circuit important.
    - de prévoir un fusible (en série) à la sortie de l'alimentation HT.

- Alternative : plutôt que d'ajuster une à une les tensions d'anode, grille de commande et grille d'écran, il est plus facile d'utiliser un « VARIAC » (un autotransformateur ajustable) qui placé avant les alimentations (donc entre le secteur et les transformateurs d'alimentation) permettra d'ajuster simultanément ces tensions.

Exploitation et test du tube en HF.

Les tests évoqués ci-avant sont des tests « statiques » (c'est-à-dire des tests réalisés à partir de tensions et de courants continus). L'idéal serait de continuer les tests en procédant à des tests « dynamiques » c'est-à-dire en appliquant un signal alternatif (HF) et en surveillant le comportement du tube. Il serait par exemple possible de placer le tube (ou la paire de tubes apparentés) dans un amplificateur HF (PA de ACOM, ALPHA, …) et de surveiller le comportement du tube en HF.

En résumé :

1. Les tests préliminaires (à l'ohmmètre) :
    a. s'assurer de la continuité du filament
    b. s'assurer qu'il n'y a pas de court-circuit franc entre les différents éléments du tube

2. La 1ère chauffe du filament du tube (avec la ventilation du tube active) : alimenter le filament à partir d'une Vfil réduite et augmenter graduellement pour atteindre la Vfil normale de fonctionnement (pour que le filament atteigne lentement sa température normale de fonctionnement).

3. La régénération du vide dans le tube (avec la ventilation du tube active) : chauffer le filament (uniquement le filament – ne pas alimenter les autres éléments : grille g1, grille

g2, anode) à la valeur du Vfil nominal pendant plusieurs heures (pour que le « getter » reconstitue le vide en éliminant les molécules de gaz).

4. La mise en exploitation/test du tube en « statique ». D'abord, le tube est mis en fonctionnement dans le but de présenter un débit anodique réduit; ceci se faisant en réduisant les tensions (Va, Vg2) et/ou en ajoutant des résistances (dans le circuit d'anode du tube). Ensuite, le tube est mis en fonctionnement pour présenter un débit normal (compte tenu de la puissance anodique maximale à ne pas dépasser – voir ultérieurement).

5. La mise en exploitation/test du tube en « dynamique » (c'est-à-dire en HF). Le tube est placé dans un amplificateur de puissance (un PA) et est testé en appliquant (à l'entrée de l'amplificateur HF) des signaux HF à amplifier.

L'apparentement des tubes (« matched pair of tubes »).

La nécessité de réaliser l'apparentement des tubes.

Lors de la mise en fabrication d'un type de tube donné (par exemple le GU74B), **les tolérances admises au niveau des procédés de fabrication et de la pureté des matériaux**, font que les tubes fabriqués ne sont pas identiques à 100%.
En effet, placés dans les mêmes conditions de fonctionnement, les tubes présenteront des différences. Par exemple, pour les mêmes Va, Vg2 et Vg1, les tubes présenteront des Ia qui seront différents.
Si un montage électronique doit présenter une bonne linéarité (par exemple un amplificateur HF de puissance), il est conseillé d'utiliser un seul élément (un seul tube électronique, un seul transistor) et d'exploiter la partie linéaire de sa courbe caractéristique.
Dans certains cas, il n'est pas possible d'utiliser un seul élément. Par exemple, dans le cas d'un amplificateur HF de grande puissance, il est généralement nécessaire (au point de vue économique) de mettre en œuvre plusieurs tubes (ou transistors) montés en parallèle, en push-pull, …
Pour garantir à l'ensemble une linéarité acceptable, il est impératif d'utiliser des éléments apparentés c'est-à-dire qui présentent des courbes caractéristiques plus ou moins identiques.
L'apparentement (des tubes et des transistors) peut être réalisé par le constructeur de l'élément, qui, dans ce cas, propose à la vente (généralement à un prix élevé) des ensembles apparentés (« matched pairs of tubes »).
Dans le cas d'éléments déclassés (par exemple les NOS des surplus militaires), il est difficile – voire impossible – de trouver des éléments apparentés; l'utilisateur doit (à partir d'un lot d'éléments) tester, comparer et former lui-même les paires d'éléments.

Les principes à mettre en œuvre en vue de l'apparentement des tubes.

Pour comparer les tubes entre-eux, il serait fastidieux - compte tenu du grand nombre de paramètres à considérer (Va, Vg1, Vg2) - de faire varier tous les paramètres.
Personnellement je préconise de comparer les tubes en les plaçant dans les conditions de fonctionnement nominales (en classe AB1); à savoir (pour un tube GU74B) :

- Vfil de 12.6V (avec un chauffage du filament pendant au moins 150 secondes et avec une ventilation du tube)

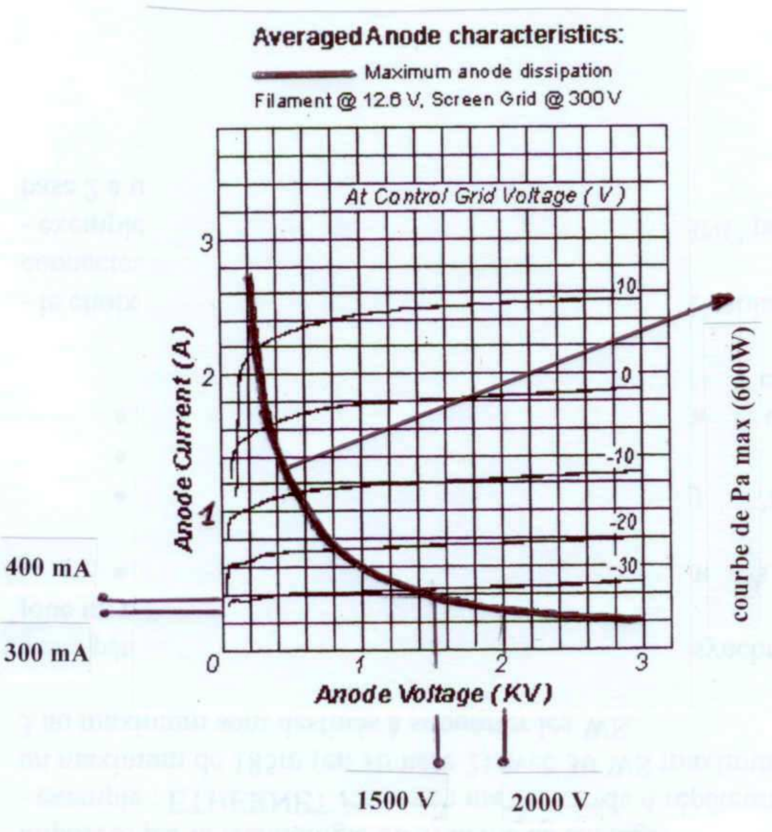
- Va de 2000V à 2200V
- Vg2 de 300V
- Vg1 de -60V à -30V

Pour « apparenter » 2 tubes (« matched pair of tubes »), il est nécessaire de procéder tube par tube et :

- en faisant varier le Vg1, de noter le Ia présenté par le tube (l'affichage des valeurs de Vg1 et de Ia se fera avec précision via des afficheurs digitaux)
- de tracer manuellement (ou via un logiciel informatique – un « tableur ») la courbe Ia f(Vg1) qui montre l'évolution du courant d'anode Ia en fonction de la tension de la grille de commande Vg1
- de comparer les courbes pour former les « matched pairs of tubes » et ce en considérant que **<u>2 tubes sont apparentés si les valeurs ne s'écartent pas de plus de 10%</u>**

Lors du relevé de la courbe Ia f(Vg1), il est impératif de ne pas dépasser la Pa c-à-d. la puissance anodique maximale admise par le tube (600W pour le GU74B). En effet, si la Va est de 2000V, il faudra s'assurer (lorsque l'on fera varier le Vg1) de ne pas dépasser un Ia de 300 mA car, sous 2000 V, la Pa maximale de 600W sera atteinte si le Ia est de 300 mA (Pa=Va x Ia → Ia=600/2000=0.3A).

Si le relevé de la courbe Ia f(Vg1) se fait en utilisant une Ua de 1500 V, le Ia maximum à ne pas dépasser (lorsque l'on fait varier le Vg1) sera de 400 mA (Ia=600/1500=0.4A). Ce Ia maximum à ne pas dépasser peut être facilement déterminé soit par le calcul ou soit à partir des courbes caractéristiques du tube.

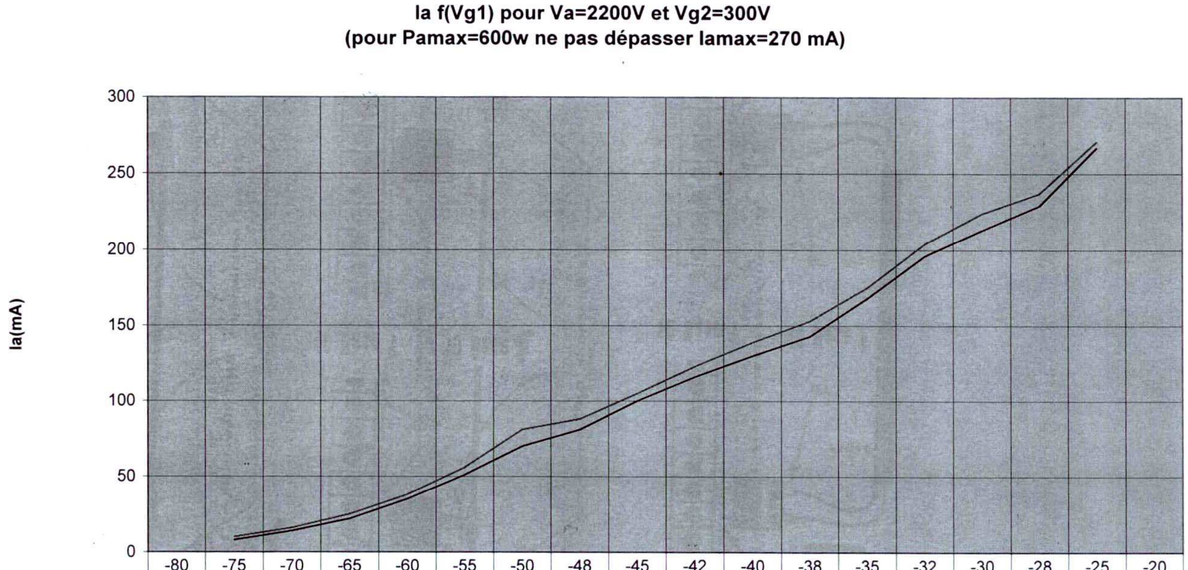


La courbe relative à la Pa maximale à ne pas dépasser nous permet de voir que pour :

- une Va de 2000V, le Ia maximum à ne pas dépasser est de 300 mA (pour une Vg1 de l'ordre de -35V)
- une Va de 1500V, le Ia maximum à ne pas dépasser est de 400 mA (pour une Vg1 de l'ordre de -30V)

Après avoir relevé les Ia f(Vg1) d'un lot de tubes, il est intéressant (après avoir encodé les données dans une feuille de calcul EXEL) de tracer les courbes et de les comparer 2 par 2 afin de trouver les paires de tubes que l'on peut apparenter (« matched pair of tubes »).

<u>Exemple de 2 tubes que l'on pourrait apparenter :</u>

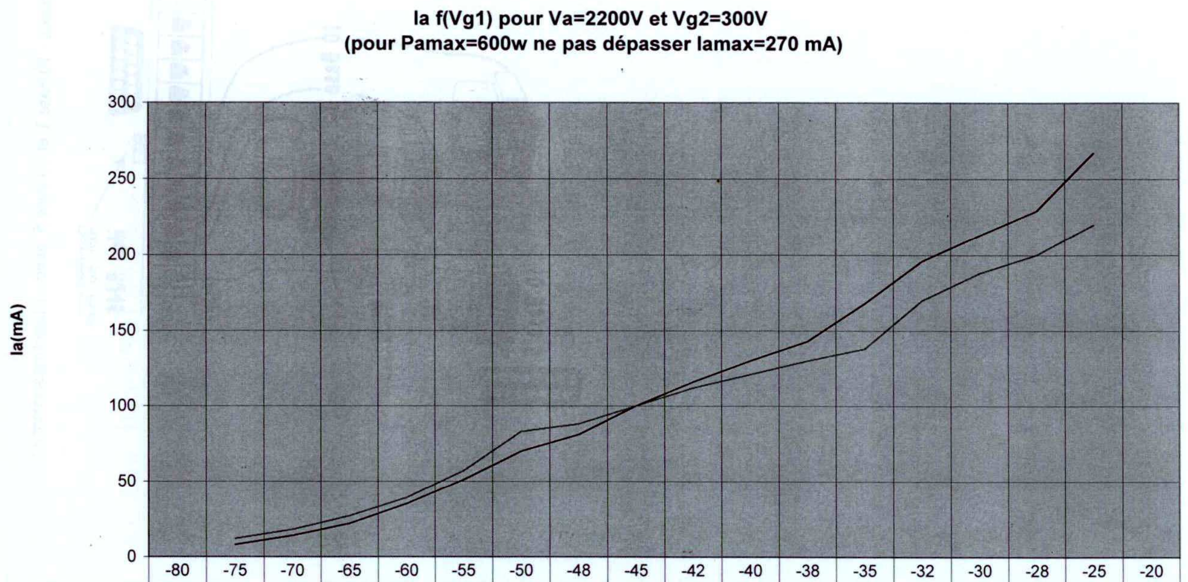


	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-48	-45	-42	-40	-38	-35	-32	-30	-28	-25	-20
Ia du tube n° 1		8	14	22	35	51	70	81	100	116	130	143	168	196	213	229	267	
Ia du tube n° 2		10	16	25	38	56	81	88	105	123	139	153	175	204	224	237	271	

Vg(V)

— Ia du tube n° 1 — Ia du tube n° 2

<u>Exemple de 2 tubes que l’on ne pourrait pas apparenter :</u>



	-80	-75	-70	-65	-60	-55	-50	-48	-45	-42	-40	-38	-35	-32	-30	-28	-25	-20
Ia du tube n° 1		8	14	22	35	51	70	81	100	116	130	143	168	196	213	229	267	
Ia du tube n° 2		12	18	27	39	57	83	88	100	112	121	130	138	170	188	200	220	

<u>La mesure et l’affichage des tensions et des courants.</u>

Les tensions et les courants relatifs à ce projet sont des valeurs DC (continu) et ce y compris pour le chauffage du filament.
Pour mesurer et afficher (parfois avec la plus grande précision possible) nous disposons d’appareils (voltmètre, ampèremètre, …) analogiques et digitaux.
On remarquera qu’actuellement, il est possible de trouver des afficheurs digitaux « grand public » (LCD ou à LED) qui présentent une précision de 0.5%.
De plus, ces afficheurs sont faciles à lire et ce contrairement aux appareils analogiques ou l’opérateur doit visualiser le positionnement d’une aiguille et interpréter (extrapoler) la mesure selon que l’aiguille est plus ou moins proche de telle ou telle graduation.

On remarquera que la mise en œuvre d’un appareil digital (par rapport à un appareil analogique) est plus onéreuse car il faut alimenter l’afficheur digital par une tension continue (correctement) filtrée et qui (parfois) doit être indépendante du circuit dans lequel la mesure se fait. Cependant on remarquera que l’afficheur digital permet :

- de positionner correctement le point décimal (en fonctions des grandeurs à afficher)
- de choisir et d’afficher l’unité (V, A, KV, mA, …)

Dans ce projet, il sera mesuré et affiché :

- pour le filament : Vfil et Ifil
- pour la grille de commande : Vg1 et Ig1
- pour la grille d’écran : Vg2 et Ig2
- pour l’anode : Va et Ia

Certaines de ces mesures se feront à partir d'un afficheur digital, d'autres se feront à partir d'un appareil analogique.

Citons quelques exemples :

- Pour « apparenter » 2 tubes (« matched pair of tubes »), il sera nécessaire de tracer (tube par tube) une courbe qui montre l'évolution du courant d'anode Ia en fonction de la tension de la grille de commande Vg1. Un affichage précis de ces valeurs mesurées (Ia et Vg1) se fera à partir d'afficheurs digitaux.

- La tension d'alimentation (en continu) du filament Vfil sera mesurée et affichée par un afficheur digital. En fonctionnement normal (donc après le reconditionnement du tube), le filament doit être alimenté en respectant scrupuleusement les prescriptions du constructeur. La tension de chauffage du filament sera ajustée manuellement sur 12.6VDC.
- Le courant de grille de commande Ig1 sera mesuré et affiché par un appareil analogique car en fonctionnement normal, le courant de grille de commande doit être nul.
- Le courant de grille d'écran Ig2 (en fonctionnement normal) peut atteindre de 20 mA à 30 mA. De plus, dans certaines circonstances, le courant Ig2 peut devenir négatif; en effet, plutôt que de capter une partie des électrons émis par la cathode, la grille écran peut être à l'origine d'une « émission secondaire » c'est-à-dire peut être parcourue par un courant négatif. Pour mesurer et afficher ce Ig2 (positif ou négatif) on utilisera de préférence un afficheur digital (qui affiche + pour les valeurs positives et – pour les valeurs négatives). On remarquera que pour remplir ce rôle, un ampèremètre analogique devrait être conçu avec un zéro central (appareil difficile à trouver).
- La tension de grille d'écran Vg2 (de 300VDC) ne devant pas être mesurée avec précision, on utilisera un voltmètre analogique.
- …

La construction de l’appareil « régénérateur- testeur » de GU74B.

L’appareil est composé de 3 modules indépendants (reliés par des cables) :

- le module « alimentation HT »
- le module « alimentation filament, grille écran g2 et grille de commande g1 »
- le module « GU74B » (le chassis qui porte un GU74B qui est refroidi en permanence par un ventilateur)

Le module « alimentation HT » (voir le schéma en fin d’article).

Le module « alimentation HT » permet de fournir une VHT de 3KV (exactement 2869VDC) et ce pour un IHT de 2A permanent.

Parmi les principaux composants de ce module, on distingue :

- le transformateur HT
- le pont de diodes
- les condensateurs de filtrage
- le circuit « soft-start » (composé d’une résistance de limitation du courant primaire et d’un circuit de temporisation)
- la résistance de limitation du courant de sortie en cas de « flashover »
- les afficheurs LCD destinés à l’affichage de la VHT et du IHT
- …

On remarquera :

- que I1 est l’interrupteur général qui enclenche le contacteur chargé d’appliquer le 230VAC au primaire du transformateur HT.
- qu’un « varistor » (MOV de 230VAC/100A) et qu’un fusible (de 30A) protègent le primaire du transformateur HT. Pour le calcul du fusible, on considère que si le secondaire fournit 2869VDC sous 2A (ç-à-d. 5738W), le primaire (sous 230VAC) devra fournir un courant de 25A (ç-à-d. 5738W/230VAC=25A). En pratique, le fusible utilisé sera un fusible de 30A.
- que l’interrupteur I3 permet d’enclencher un ventilateur destiné au refroidissement de tous les composants de l’alimentation HT.

Le transformateur HT.

Le transformateur HT (de récupération) est un transformateur de 4KVA avec un primaire de 230VAC, un secondaire de 2A permanent et diverses prises secondaires de 0VAC-210VAC-370VAC-535VAC-2035VAC; ce qui correspond (après un redressement en double alternance et un filtrage par condensateur) à des tensions continues de 0-296VDC-522VDC-754VDC-2869VDC.

On remarquera que, si le secondaire est exploité dans l’autre sens, les tensions alternatives sont 0VAC-1500VAC-1665VAC-1825VAC-2035VAC; ce qui correspond (après un redressement en double alternance et un filtrage par condensateur) à des tensions continues de 0VDC-2115VDC-2348VDC-2573VDC-2869VDC.

On rappellera que le redressement (en double alternance avec un filtrage par condensateur) fournit une tension continue égale à √ 2 fois la tension alternative (car le condensateur se charge à la valeur de crête de la tension alternative). Par exemple, une tension alternative de 2035VAC donnera (après un redressement en double alternance et un filtrage par condensateur) une tension continue de 2035 x 1.41 = 2869VDC.

Le pont de diodes.
Après avoir recherché (sur Internet) un redresseur HT (4KV- 2A), j'ai décidé (vu le coût élevé de ce composant) qu'il était plus raisonnable de construire le pont à partir d'un ensemble de diodes classiques (40 diodes BY255 de 3A/1300V).
Pour chacune des 4 branches du pont, j'utilise 10 diodes (5 séries de 2 diodes en parallèle) ce qui permet de présenter un pont capable de supporter 6500VDC (5 x 1300VDC) par branche du pont et 6A (2 diodes de 3A en parallèle).

Le bloc de filtrage.
Le condensateur de filtrage à utiliser doit présenter une capacité de quelques dizaines de microfarads et une isolation de 4KV.
La formule classique (voir ARRL Handbook) est :

$$C(\mu F)= 10^{6} / (2 \times \sqrt{3} \times Fr \times Rl \times Tripple)$$

Le calcul de la valeur de cette capacité est fonction :

- de « Tripple » qui est le facteur de « ripple » admis
- de « Fr » qui est fonction du type de redressement (à une alternance, à double alternance, …) et de la fréquence du secteur (50Hz, 60 Hz)
- de « Rl » qui est la résistance de la charge à alimenter

Si on considère :

- un redressement « double alternance » à la « fréquence secteur » de 50 Hz → Fr = 2 x 50 = 100
- un taux de « ripple » de 3% → Tripple = 0.03
- l'alimentation d'une charge sous 2500VDC et 1.5 A → Rl = 2500/1.5 = 1666Ω.

Dans ces conditions de fonctionnement, la capacité à utiliser sera de :

$C(\mu F)= 10^{6} / (2 \times 1.73 \times 100 \times 1666 \times 0.03) = 10^{6}/17314 = 57.75\mu F$

Pour mettre en œuvre une telle capacité, l'idéal serait d'utiliser un (gros) condensateur (généralement à l'huile) d'une capacité proche de 57µF et isolé à 4KV.
N'ayant pas trouvé un tel condensateur, il a été nécessaire de construire un condensateur équivalent à partir de la mise en série de 8 condensateurs électrolytiques classiques de 470µF avec isolation de 450VDC. Cette mise en série de 8 condensateurs donne une capacité de 58µF (ç-à-d. 470µF/8) avec une isolation de 3600VDC(c-à-d. 8 x 450VDC).

Les résistances « shunt » (à placer en parallèle sur chacun des 8 condensateurs).
Pourquoi utiliser des résistances « shunt » ?
Rappelons nous que :

- les techniques de fabrication des condensateurs électrolytiques classiques sont à l'origine de condensateurs qui peuvent présenter de grandes tolérances (jusqu'à 20% en plus ou en moins) au niveau de la capacité.
- la tension, qui alimente plusieurs condensateurs placés en série, se repartit de façon inversement proportionnelle à la valeur de la capacité. En effet, le condensateur de plus faible capacité présente à ses bornes une tension plus élevée que celles présentées par chacun des autres condensateurs.

En utilisant 8 condensateurs en série (en principe de la même capacité – ç-à-d. de 470µF/ 450VDC), nous devons admettre que certains d'entre eux (à cause des tolérances) doivent supporter une tension qui serait proche de la tension d'isolement (450VDC).

Pour éviter cela, il est nécessaire de répartir la VHT entre les 8 condensateurs utilisés et ce en plaçant (en parallèle) une résistance « shunt » sur chacun des condensateurs.

Calcul de la valeur d'une résistance « shunt ».
Considérant que l'ARRL Handbook conseille d'utiliser 100Ω par Volt, on en déduira que pour une VHT de 2500VDC, la valeur totale de la résistance « shunt » sera de 2500 x 100 = 250KΩ. La valeur de chacune des résistances « shunt » sera donc de 250KΩ/8 = 31.25KΩ (en pratique 33KΩ).

Calcul de la puissance à dissiper par chacune des résistances « shunt ».
Pour une VHT de 2500VDC, la puissance à dissiper par une résistance « shunt » sera de 2.9W (ç-à-d. $P=U^2/R = (2500/8)^2/33000=2.9W$).
En pratique, les 8 résistances « shunt » choisies sont des résistances de 33KΩ/12W.
Dans ces conditions, on remarquera que la tension aux bornes de chacune des résistances « shunt » (donc de chacun des condensateurs) est de 2500/8=312.5VDC alors que chaque condensateur utilisé présente une tension d'isolation de 450VDC.

Le circuit « soft-start ».
Le circuit « soft-start » est composé d'une résistance de limitation du courant primaire et d'un circuit de temporisation.
Lors de la mise sous tension de l'alimentation HT (à la fermeture de l'interrupteur I1), l'énorme courant primaire (car les condensateurs déchargés se présentent comme un court-circuit) doit être limité pour éviter des problèmes tels que :

- le déclanchement du fusible à chaque mise sous tension (ce qui imposerait d'utiliser un fusible surdimentionné)
- le « stress » du pont de diodes qui (pendant un court instant) présente sa sortie en court-circuit

Pour limiter le courant primaire à l'enclenchement, on utilise un dispositif « soft-start » qui consiste à placer une résistance en série dans le circuit primaire et à court-circuiter cette résistance après une fraction de seconde (via un circuit de temporisation).
Personnellement j'utilise :

- une résistance de 33Ω/50W dans le circuit primaire du transformateur
- un dispositif de temporisation réglable (de 0.04 à 1 seconde) chargé de court-circuiter la résistance

Calcul de la résistance de limitation de 33Ω/50W.
Pendant une fraction de seconde (de l'ordre de quelques dizaines de millisecondes), lors de la mise sous tension de l'alimentation HT, le pont redresseur alimente le condensateur de filtrage, qui (initialement déchargé) se présente comme un court-circuit; ce qui (côté circuit primaire) est à l'origine d'un courant primaire important.
A cet instant, la tension fournie par le pont est de l'ordre de 2035VDC (en théorie, il faut retirer autant de fois 0.7V qu'il y a de diodes actives).
On se rappellera que les choix réalisés (lors de la construction du pont redresseur) permettent d'exploiter un courant maximum de 6ADC. Par sécurité, nous utiliserons dans les calculs un courant maximum de 5ADC.
Du côté du secondaire, la puissance (instantanée) à considérer est de 10175W (P=U x I= 2035 x 5=10175W); celle-ci, reportée au primaire (si on considère un transformateur idéal dont le rendement est de 100%), correspond à un courant primaire de 44A (P=U x I → I=P/U=10175/230=44A).

On se rappellera que le courant primaire maximum (qui a été calculé pour un fonctionnement normal) a été fixé à 25A (voir « calcul du fusible dans le circuit primaire »).
Calculons la valeur ohmique de la résistance de limitation (à placer en série dans le circuit primaire du transformateur) pour limiter le courant primaire à 25A : $P=R \times I^2$ → $R=P/I^2 = 10175/(25)^2=16.28\Omega$.
Par sécurité, la résistance de limitation qui a été choisie, est une résistance de 33Ω/50W.
La puissance à dissiper par cette résistance de limitation à été choisie arbitrairement à 50W car cette résistance ne doit être active que pendant une fraction de seconde (elle doit être court-circuitée par le circuit de temporisation après un délai de l'ordre de 0.04 à 1 seconde – voir « le circuit de temporisation»).
On remarquera que, dans le cas d'une anomalie du circuit de temporisation (si par exemple le relais ne s'enclenche pas et de ce fait ne court-circuite pas la résistance de limitation), la résistance de limitation servira de fusible car la puissance dissipée de 50W sera atteinte pour un courant primaire de 1.2A ($P=R \times I^2$ → $I^2=P/R=50/33=1.51A$ → $I=1.2A$).

<u>Le circuit de temporisation.</u>
Le circuit de temporisation (utilisé dans le dispositif « soft-start ») permet de court-circuiter (après un délai de 0.04 à 1 seconde) la résistance de 33Ω/50W (qui est placée dans le circuit primaire de l'alimentation HT).
En effet, lors de la mise sous tension de l'alimentation HT, le courant primaire du transformateur HT est d'abord limité par la présence de la résistance (33Ω/50W) et ensuite, après un délai de 0.04 à 1 seconde (en fait le temps nécessaire pour que les condensateurs de l'alimentation HT commencent à se charger), la résistance est court-circuitée par le circuit de temporisation.
Le circuit de temporisation est construit selon le principe suivant :

- le condensateur C (de 100µF) est chargé sous 12VDC au travers d'une résistance (en fait une résistance fixe de 1KΩ en série avec un potentiomètre de 0-25KΩ)
- le transistor TR conduit lorsque Uc (la tension aux bornes de C) atteint et dépasse 4V c-à-d. lorsque Uc atteint et dépasse la tension de la diode zener (3.3V) plus le VBE (0.7V) du transistor
- le transistor TR active le relais qui court-circuite la résistance de 33Ω/50W

<u>Calcul de la constante de temps (RC).</u>
Calculons la constante de temps caractéristique de l'ensemble formé par le condensateur C (100µF) et des résistances (une résistance fixe de 1KΩ en série avec un potentiomètre de 0-25KΩ) :

- si le potentiomètre est au minimum (0KΩ), la valeur de la résistance est de 1KΩ → $RC=10^3 \times 100 \times 10^{-6} = 0.1$ seconde.
- si le potentiomètre est au maximum (25KΩ), la valeur de la résistance est de 26KΩ → $RC=26 \times 10^3 \times 100 \times 10^{-6} = 2.6$ secondes.

Calculons le délai de temporisation lorsque le potentiomètre est au minimum (le RC est égal à 0.1 seconde) et lorsque le potentiomètre est au maximum (le RC est égal à 2.6 secondes). Pour ce faire, nous devons utiliser la formule relative à la charge d'un condensateur en fonction du temps : $\boxed{\mathbf{Uc=U \times (1 - e^{-t/RC})}}$

A partir de cette formule, essayons de dégager « t ».

$Uc/U=1 - e^{-t/RC}$ → $e^{-t/RC} =1-Uc/U = (U-Uc)/U$ → $e^{t/RC} = U/(U-Uc)$ → $t/RC=Ln (U/(U-Uc))$

→ $\boxed{\mathbf{t=RC \times Ln (U/(U-Uc))}}$

Rappels mathématiques :

- si e^y=z → y=Ln(z)
- Ln est un logarithme népérien : Ln(z) = 2.3 x $\log_{10}$(z)
- e = 2.71828…

Pour :

- U=12VDC et Uc=4VDC → t=RC x Ln ((12/(12-4)) = RC x Ln (1.5) = RC x 0.4054
- un RC de 0.1 seconde (le potentiomètre est sur 0KΩ) → t = 0.1 x 0.4054 = 0.04 seconde.
- un RC de 2.6 secondes (le potentiomètre est sur 25KΩ) → t = 2.6 x 0.4054 = 1.05 seconde.

<u>En résumé, grâce au circuit de temporisation, la résistance de 33Ω/50W est court-circuitée après une temporisation de 0.04 seconde si le potentiomètre est au minimum et de 1.05 seconde si le potentiomètre est au maximum.</u>

On remarquera :

- que dans la pratique, les temps de temporisation peuvent être différents de ceux calculés car le condensateur électrolytique utilisé peut présenter une tolérance (en plus ou en moins) de l'ordre de 20%
- qu'une résistance de 1MΩ a été placée en parallèle sur le condensateur C et ce dans le but de permettre au condensateur C de se décharger lorsque le circuit de temporisation est mis en « power off »

<u>Le transistor de commutation.</u>
Le transistor qui commande le relais (12VDC/110Ω) est un transistor classique capable de supporter un Ic de l'ordre de 100mA (Ic nécessaire = 12V/110Ω = 100mA).
La résistance dans le circuit de base permet de doser le Ib (qui permet de choisir un collage franc du relais).

<u>Calcul de cette résistance (Rb) du circuit de base.</u>
Dans le cas d'un transistor monté en « émetteur commun » nous avons la relation Ic = β x Ib (avec un « β » de l'ordre de 100).
Pour que le Ic soit de 100mA, il faut que le Ib soit de 1mA.
La relation Uc=Vbe+(Rb x Ib) nous permet de calculer le Rb nécessaire → 4V = 0.7 V + (Rb x 1mA) → Rb = (4V – 0.7V)/1mA → Rb = 3.3V/1mA = 3.3KΩ
En pratique, j'ai choisi une résistance fixe de 2.7KΩ en série avec un potentiomètre de 0-30KΩ.

<u>La résistance série placée dans la sortie HT+.</u>
La résistance (50Ω/50W) placée en série dans la sortie HT+, permet de limiter (et même d'éliminer) les dégâts provoqués par un éventuel « flashover » (voir antérieurement).
Rappelons que lors d'un « flashover », il y a apparition d'un courant de court-circuit (très élevé mais de courte durée) qui s'établit entre l'anode et une des grilles (généralement la grille-écran g2 – parfois la grille de commande g1) et qui est susceptible d'endommager le tube et/ou certains des composants des circuits d'alimentation (de l'anode, de la grille-écran g2 et de la grille de commande g1).
Concernant cette résistance série de limitation, on remarquera que les choix de la valeur ohmique ainsi que de la puissance à dissiper doivent se faire par estimation car il est difficile de prévoir les caractéristiques présentées par un éventuel « flashover ».
Généralement :

- la valeur ohmique choisie représente quelques dizaines d'ohms (pour limiter en conséquence l'éventuel courant de court-circuit provoqué par le « flashover »). La valeur qui a été choisie est de 50Ω.
- la valeur de la puissance à dissiper sera au moins égale à celle qui est à dissiper lors d'un fonctionnement normal. Pour un IHT de 1A, la puissance à dissiper sera de P=R x I^2 = 50 x 1=50W. La valeur qui a été choisie est de 50W.

<u>L'affichage de la VHT et du IHT.</u>
L'affichage se fera via des afficheurs LCD dont la position du point décimal sera choisie pour exprimer des KV (pour la VHT) et des A (pour le IHT).

<u>L'affichage de la VHT</u>.
L'affichage de la VHT se fait à partir d'un afficheur LCD (0-20VDC) sous le format d'affichage « nn.nn » - par exemple 1.95VDC mesuré sera affiché 01.95KVDC.
Pour mesurer la VHT, on placera (entre la sortie HT+ et la masse) une résistance de 100MΩ, qui, sous une VHT de 3000VDC, laissera passer un courant de mesure (Im) de 30µA (Im=V/R = 3000V/100MΩ = 30µA).
En pratique cette résistance de 100MΩ sera constituée d'une série de résistances telles que :

- 9 résistances de 10MΩ
- 1 résistance de 9MΩ
- 1 résistance de 900KΩ
- 1 résistance de 100KΩ (précision de 1%)
- 1 potentiomètre de 0-100KΩ

Le potentiomètre de 0-100KΩ (qui est destiné à compenser les tolérances présentées par les résistances utilisées) est réglé pour que le Im soit de 30µA et ce pour une VHT de 3000VDC. La résistance qui permet de mesurer la VHT est la résistance de 100KΩ (précision 1%) car la tension à ses bornes alimente l'afficheur LCD (0-20VDC). En effet, pour une VHT de 3000VDC, le Im est de 30µA et la tension aux bornes de la résistance de 100KΩ est de 100KΩ x 30µA = 3VDC. En résumé, pour une VHT de 3000VDC, l'afficheur mesure 3VDC et affiche (selon le format d'affichage « nn.nn ») une tension de 03.00KVDC.
On remarquera :

- que la résistance de 100KΩ sera placée (pour des raisons évidentes de sécurité) du côté « froid » (ç-à-d. le plus loin possible de la sortie HT+).
- la présence d'une résistance de 1Ω/30W (voir ci-après – l'affichage du IHT) dont la valeur est à négliger dans la mesure de la VHT.
- que la puissance à dissiper des résistances utilisées est de peu d'importance car le Im est faible (pour VHT de 3000VDC, le Im est de 30µA) – pour une résistance de 10MΩ, la puissance à dissiper sera de 9mW (P=R x I^2 =10MΩ x 30^2µA=9mW).

<u>L'affichage du IHT.</u>
L'affichage du IHT se fait à partir d'un afficheur LCD (0-2VDC) sous le format d'affichage « n.nnn » - par exemple 1.252VDC mesuré sera affiché 1.252ADC.
Pour mesurer le IHT, on placera (entre la sortie HT- et la masse) une résistance de 1Ω (précision de 1%) dont la tension aux bornes alimentera l'afficheur LCD (0-2VDC). En effet, on constatera qu'une résistance de 1Ω traversée par un courant, présente à ses bornes une tension dont la valeur est celle du courant; la grandeur mesurée (en Volts) et affichée correspond au courant qui traverse la résistance.
Par exemple, si I=1A → U=R x I=1 x 1 = 1V; si I=2A → U=R x I=1 x 2 = 2V; si I=0.5A → U=R x I=1 x 0.5 = 0.5V.

La résistance de 1Ω doit avoir une puissance à dissiper qui sera calculée en fonction du IHT maximum à considérer. Pour un IHT maximum de 2A, la puissance à dissiper sera de 4W ($P=R \times I^2=1 \times 2^2=4W$).
En pratique, la résistance utilisée sera une résistance de 1Ω/30W à 1% de précision.
On remarquera que la sortie HT- n'est pas directement reliée à la masse; elle est reliée à la cathode du tube testé.

<u>Le chassis qui porte le tube GU74B.</u>

Le tube à régénérer et à tester (placé sur le « socket SK-1A ») est continuellement ventilé et protégé contre les « flashovers » et ce grâce à 2 « tubes à gaz » (GTA=Gas Tube Arrestor); l'un (de 350VDC) protège la grille de commande g1 et l'autre (de 400VDC) protège la grille d'écran g2.
On remarquera la présence d'une résistance (de 10Ω/50W dans le circuit de cathode) ainsi qu'un ensemble de résistances (1KΩ, 50KΩ, 100KΩ dans le circuit d'anode) qui sont utilisées pendant les différentes phases de régénération du tube (voir antérieurement).
Les tensions d'alimentation (-Vg1, +Vg2 et VHT) sont appliquées simultanément par l'intermédiaire de l'interrupteur I2 qui commande 2 relais :

- un relais (Rg) dont les contacts NO (protégés par des MOV de 200 et de 369VDC) alimentent les 2 grilles g1 et g2
- un relais (RTH) « haute tension » (relais KILOVAC HC-2 pour 8KV-25A) dont le contact NO (protégé par une MOV 3KVDC) alimente l'anode du tube

Le circuit « alimentation du filament » (voir le schéma en fin d'article).

Le circuit « alimentation du filament » permet de réaliser, d'abord la régénération du tube (qui n'a plus été utilisé depuis longtemps), et ensuite le test du tube régénéré.
La régénération du tube (voir antérieurement) consiste, d'abord à régénérer le filament du tube, et ensuite à « dégazer » le tube.
On se rappellera qu'il est conseillé de régénérer le filament (en le chauffant lentement pour finalement l'amener à sa température normale de fonctionnement) et que le « getter » doit être chauffé pour « dégazer » le tube.
Pour ce faire, il faut disposer d'une « alimentation du filament » qui est capable de fournir 12.6V-3.6A (en alternatif ou en continu), qui est réglable en tension et qui permet de limiter le courant secondaire lors de l'enclenchement de l'alimentation
Remarque : l'alimentation du filament se fera en continu.

L'alimentation est construite à partir des composants classiques, à savoir, un transformateur (230VAC-15VAC-8A au secondaire), un redresseur en pont (40V/25A), un bloc de filtrage (2 condensateurs de 4700µF/30V reliés en parallèle), un afficheur LCD (0-20VDC), un galvanomètre analogique (0-10ADC), un fusible (1A), une résistance de 10Ω/50W et un ensemble formé par une résistance de 82Ω/50W en série avec un potentiomètre bobiné de 0-50Ω/25W (voir ci-après).

Calcul de la valeur du condensateur de filtrage.
La formule à utiliser (voir antérieurement) est **$C(\mu F)= 10^6 / (2 \times \sqrt{3} \times Fr \times Rl \times Tripple)$**
Considérons :

- un redressement « double alternance » à la « fréquence secteur » de 50 Hz → Fr = 2 x 50=100
- un taux de « ripple » de 3% → Tripple=0.03
- l'alimentation d'une charge sous 12.6VDC et 3.6A → Rl=12.6/3.6=3.33Ω

Dans ces conditions de fonctionnement, la capacité à utiliser serait de : $C(\mu F)=10^6/ (2 \times 1.73 \times 100 \times 3.33 \times 0.03)=10^6/34.3=29155\mu F$
Personnellement, je me suis limité à utiliser 2 condensateurs de 4700µF/30VDC (reliés en parallèle).

Calcul du gabarit à donner au fusible.
En fonctionnement normal, la puissance au secondaire étant de 46W (P=U x I=12.6 x 3.6=45.36W=46W), on peut estimer (si on considère un rendement de 100%) que le primaire doit présenter une puissance de 46W sous 230VAC c-à-d. un courant primaire de 200mA (P=U x I → I=P/U=46/230=0.2A).
Compte tenu des pertes, le courant primaire sera estimé à 300mA et le fusible utilisé aura un gabarit de 1A.

Rôle joué par la résistance de 10Ω/50W.
La résistance de 10Ω/50W (placée en série dans la sortie de l'alimentation) permet d'éviter de « stresser » le filament (qui n'a plus été utilisé depuis longtemps). En effet, la résistance à froid du filament étant de l'ordre de 1.7Ω, on constate que si on applique une tension de 12.6VDC, le courant instantané sera de 7.4ADC (I=U/R=12.6/1.7=7.4ADC) au lieu des 3.6ADC qui sont caractéristiques d'un fonctionnement normal.
Cette résistance de 10Ω/50W limite le courant de chauffage à 1.1ADC (I=U/R=12.6/(10+1.7)=1.1ADC) ce qui permet de chauffer lentement le filament.

L’interrupteur I4 permet (manuellement) de court-circuiter cette résistance.
La puissance à dissiper par cette résistance sera de l’ordre de 12W ($P=RI^2=10 \times (1.1)^2=12.1W$) – la puissance choisie sera de 50W.

<u>Rôle joué par l’ensemble formé par la résistance de 82Ω/50W en série avec le potentiomètre bobiné de 0-50Ω/25W.</u>

Pour permettre un réglage de la tension à appliquer au filament (lors de la régénération du filament), on utilise un ensemble formé par une résistance fixe (82Ω/50W) et d’un potentiomètre bobiné (0-50Ω/25W); ceci permettant d’exploiter en sortie une plage de tension de l’ordre de 12VDC à 13.4VDC.
On remarquera que pour exploiter une plage plus large (par exemple de quelques Volts à …) il faut remplacer la résistance de 82Ω par une résistance de plus grande valeur ohmique.

<u>Estimation de la puissance à dissiper par les 2 résistances.</u>
Pour un courant primaire de 300mA (en fonctionnement normal – voir ci-avant), la puissance à dissiper par :

- la résistance de 82Ω est de 7.38W ($P=R \times I^2=82 \times (0.3)^2=7.38W$) – la puissance choisie sera de 50W
- le potentiomètre bobiné de 50Ω est de 4.5W ($P=R \times I^2=50 \times (0.3)^2=4.5W$) – la puissance choisie sera de 25W

<u>Le circuit « alimentation de la grille écran g2 » (voir le schéma en fin d’article).</u>

Le circuit « alimentation de la grille écran g2 » fournit les différentes tensions de grille d’écran nécessaires à la régénération du tube (voir antérieurement); en fait, cette alimentation fournit une tension continue que l’on peut faire varier de 0 à 370VDC.
L’alimentation est construite à partir des composants classiques, à savoir, un transformateur (primaire de 230VAC- secondaire de 260VAC), un pont redresseur (400VDC-2A), un condensateur (100µF/450VDC), deux galvanomètres (0-50mA et 0-600VDC) et une résistance variable formée à partir d’une résistance fixe (1.5KΩ /50W) et d’un potentiomètre (0-2.2KΩ/50W).

<u>Calcul de la plage des tensions applicables à la grille écran g2.</u>
On considère que la résistance variable (formée à partir de la résistance fixe de 1.5KΩ/50W et du potentiomètre 0-2.2KΩ/50W) est un simple pont diviseur de tension (on considère que la régénération du tube se fait sans l’apparition d’un courant de grille d’écran Ig2).
Sachant que la tension de sortie du transformateur (260VAC) nous donne (après redressement double alternance et filtrage par le condensateur) une tension continue de 367VDC (260V x 1.41=367VDC); on constate que le pont diviseur de tension est traversé par un courant de l’ordre de 120mA.
(I=U/R=367VDC/(2.2KΩ +1.5KΩ)=367VDC/3.7KΩ =0.1A – par sécurité on utilisera 120mA si on considère un courant de grille écran accidentel de 20mA.
La plage des tensions applicables à la grille écran va de 150VDC à 370VDC; en effet :

- si le potentiomètre est au minimum → Vg2min=R x I=1.5KΩ x 0.1=150VDC
- si le potentiomètre est au maximum → Vg2max=R x I=3.7KΩ x 0.1=370VDC

<u>Calcul des puissances à dissiper par les 2 résistances.</u>
On choisira une puissance de 50W car :

- pour la résistance de 1.5KΩ → $P=R \times I^2=1.5K\Omega \times (120mA)^2=21.6W$

- pour le potentiomètre de 2.2KΩ → $P=R \times I^2=2.2K\Omega \times (120mA)^2=31.7W$

Calcul de la valeur du condensateur de filtrage.
La formule à utiliser (voir antérieurement) est **C(µF)= 10^6 / (2 x √3 x Fr x Rl x Tripple)**
Considérons :

- un redressement « double alternance » à la « fréquence secteur » de 50 Hz → Fr = 2 x 50=100
- un taux de « ripple » de 3% → Tripple=0.03
- l'alimentation d'une charge sous 367VDC et 120mA → Rl=367/0.12=3058Ω

Dans ces conditions de fonctionnement, la capacité à utiliser sera de : C(µF)=10^6/ (2 x 1.73 x 100 x 3058 x 0.03)=10^6/31742=31.5µF
Le condensateur choisi sera de 100µF/450VDC.

Calcul du gabarit du fusible.
La puissance consommée par le secondaire étant de 44W (P=U x I=367VDC x 120mA=44W), on peut estimer (si on considère un rendement de 100%) que le courant consommé par le primaire est de 200mA (Iprimaire=P/U=44/230=0.2A). Le gabarit du fusible choisi sera de 1A.

Le circuit « alimentation de la grille de commande g1 » (voir le schéma en fin d'article).

Le circuit « alimentation de la grille de commande g1» fournit les différentes tensions Vg1 qui sont nécessaires, d'une part, à la régénération du tube (voir antérieurement) et, d'autre part, au relevé des Ia et Vg1 qui serviront au traçage de la courbe Iaf(Vg1) (voir la constitution de « matched pairs of GU74B »). En fait, cette alimentation fournit une tension continue que l'on peut faire varier de -20 à -104VDC.
L'alimentation est construite à partir des composants classiques, à savoir, un transformateur (primaire de 230VAC- secondaire de 145VAC), un pont redresseur (400VDC-2A), un condensateur (47µF/250VDC), un galvanomètre (0-20mA), un afficheur LCD (0-200VDC), une diode Zener (20V/5W) et une résistance variable (formée à partir d'une résistance fixe et d'un potentiomètre).

Calcul de la plage des tensions applicables à la grille de commande g1.
La diode Zener (20V/5W) fixe le potentiel minimum à -20VDC (ceci pour éviter que le courant d'anode Ia n'atteigne des valeurs dangereuses pour le tube).

On considère que la résistance variable (formée à partir de la résistance fixe de 5.6KΩ/5W et du potentiomètre 0-4.7KΩ/4W) est un simple pont diviseur de tension (on considère que la régénération du tube se fait sans l'apparition d'un courant de grille de commande Ig1).
Sachant que la tension de sortie du transformateur (145VAC) nous donne (après redressement double alternance et filtrage par le condensateur) une tension continue de 205VDC (145V x 1.41=205VDC); on constate que le pont diviseur de tension est traversé par un courant de 18mA (I=U/R=(205-20)VDC/(5.6KΩ +4.7KΩ)=185VDC/10.3KΩ =18mA).

La plage des tensions applicables à la grille de commande va de -20VDC à -104VDC; en effet :

- en A → Vg1min=-20VDC
- en B → Vg1max=-20-(4.7KΩ x 0.018)=-20-84.6=-104.6VDC

Calcul des puissances à dissiper par les 2 résistances et la diode Zener.

On choisira une puissance de 5W car :

- pour la résistance de 5.6KΩ → $P=R \times I^2=5.6K\Omega \times (18mA)^2=1.81W$
- pour le potentiomètre de 4.7KΩ → $P=R \times I^2=4.7K\Omega \times (18mA)^2=1.5W$
- pour la diode Zener → P=U x I=20VDC x 18mA=0.36W

Calcul de la valeur du condensateur de filtrage.

La formule à utiliser (voir antérieurement) est **$C(\mu F)= 10^6 / (2 \times \sqrt{3} \times Fr \times Rl \times Tripple)$**

Considérons :

- un redressement « double alternance » à la « fréquence secteur » de 50 Hz → Fr = 2 x 50=100
- un taux de « ripple » de 3% → Tripple=0.03
- l'alimentation d'une charge sous 205VDC et 18mA → Rl=205/0.018=11389Ω

Dans ces conditions de fonctionnement, la capacité à utiliser sera de : $C(\mu F)=10^6/ (2 \times 1.73 \times 100 \times 11389 \times 0.03)=10^6/118218=8.5\mu F$

Le condensateur choisi sera de 47µF/250VDC.

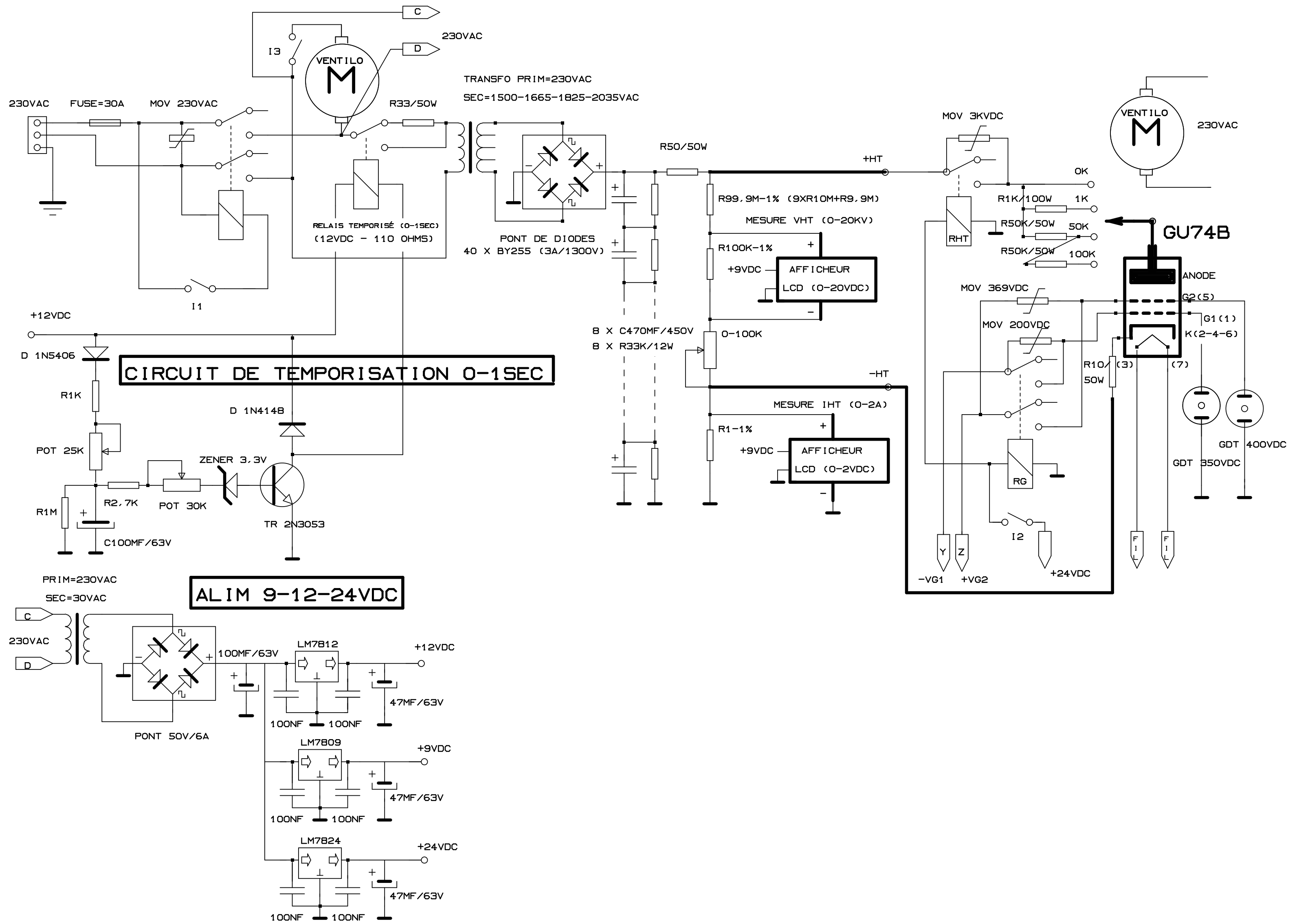
Calcul du gabarit du fusible.

La puissance consommée par le secondaire étant de 3.7W (P=U x I=205VDC x 18mA=3.7W), on peut estimer (si on considère un rendement de 100%) que le courant consommé par le primaire est de 16mA (Iprimaire=P/U=3.7/230=0.016=16mA). Le gabarit du fusible choisi sera de 100mA.

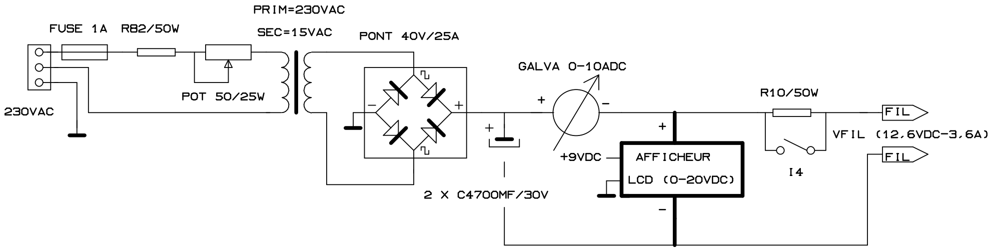
Ici se termine l'article. Pour tous commentaires et/ou remarques diverses, vous pouvez me contacter via on4laj@uba.be ou on4laj@qsl.net ou roger.capouillez@skynet.be. De plus, l'article complet peut être lu via « http://www.qsl.net/on4laj » ou « http://users.skynet.be/on4laj » .

73 QRO de ON4LAJ.

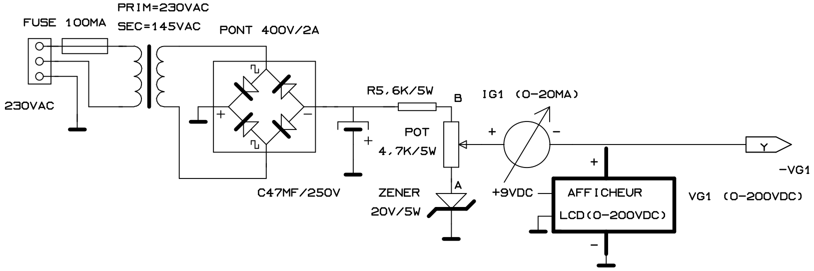
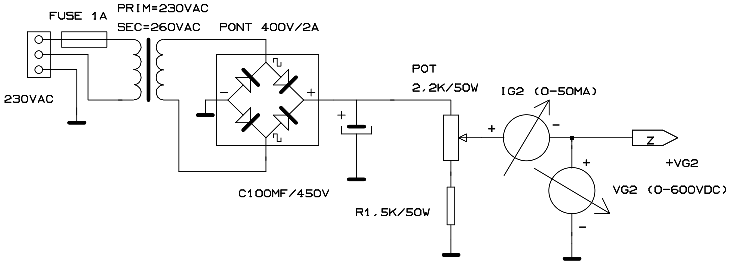
ALIM HT (3KVDC-2A)-ON4LAJ-03/2009



ALIM FILAMENTS (12.6VDC-3.6A)



ALIM GRILLE G1 (-20 A -104VDC)



ALIM GRILLE G2 (0 A 370VDC)